

自動監視システムの最適点検時間*

Optimal maintenance interval time for monitoring system

荒 深 美和子 中 村 正 治 中 川 覃 夫

Miwako ARAFUKA Syouji NAKAMURA Toshio NAKAGAWA

金城学院大学生生活環境学部

愛知工業大学経営情報科学部

概 要

自動販売機の運用は、通信機器による自動監視が行われ、さまざまな機器の障害に迅速に対応できるように設計されている。すなわち、運用状況や障害は、自動監視システムにより常時状況を通知され、障害が発生すれば、その状況に応じて係員や技術員を現地に出向させるかどうかを判断して、障害を排除している。障害が発生した場合の対応方法は、設置場所によって、常時無人の場合と自動販売機の近辺に関係者がいる自動販売機があり、その対応はそれぞれの状況によって異なる。本稿では、常時無人の自動販売機、特に金融機関ATMの自動監視システム運用における点検モデルを提案する。障害の程度によって2種類の故障を考慮し、各状態における損失費用を導入して、無人運転期間の期待費用を導出する。さらに、この費用を最小にする最適点検方を求め、数値例を与え、種々議論する。

1. はじめに

近年自動販売機は、セキュリティーガードを装備して犯罪を未然に防ぐ機能を備えている。たばこ自動販売機では収容個数の多さと使いやすさの機能を追求している。さらに、食券や入場券などの券売機は、メニュー数の多さや主要構成の容量を最小化し、設置面積をおさえて高い費用対効率を実現している。また、電子マネー対応のたばこ自動販売機や券売機が開発され実用化されている。通信分野においても、離れた場所から自動販売機が制御できるデータサーバシステムや売上管理システム等、自動販売機から情報端末へとマルチメディアの世界に展開している [5]。このような状況の中で、もはや自動販売機や金融機関のATM (Automated Teller Machine 現金自動預入払出機) は社会資本の一部となっている。多数の自動販売機やATMを監視する業務は重要であり、特に、障害や故障に迅速に対応することは企業の信頼と顧客サービスの観点から重要である。ATMでは、警備会社と契約して、現金の補充と簡単な修理などの点検・保全業務を委託している [1]。

通常、自動販売機やATMの設置場所は、

* This paper is an expansion and revision of a paper originally submitted to Computers Mathematics with Applications, Vol.46, Issue 7, October, 2003, pp.1095-1101.

顧客に利便性のよい駅，デパート，スーパーマーケットや公共施設などに設置されているものが多い。一部の自動販売機やATMは回線で接続され，稼働状況の監視をオンラインシステムで行っている。

自動販売機やATMを集中的に監視をしているセンター（集中監視センター）では，障害の状況をディスプレイ端末機に表示する。また，ATMではブース内の利用者と障害の状況を連絡し合うための専用電話も同時に集中管理を行っている。集中監視センターでは，障害が発生したとき，監視員が，その状況に応じて，端末機の遠隔操作により障害を解除するか，そうでなければ，現地に係員や技術員を向かわせて故障箇所を修理する。後者の場合，監視員が契約している警備保障会社もしくは，自動販売機やATMメーカーの保守センターに電話連絡してすみやかに障害や故障に対処させる。特に，ATMの管理技術はその取り扱う商品が現金であることから，高い運用管理技術を誇っており，それらの技術は一般の自動販売機にも流用されている。

本稿では，故障になるかもしれない障害と直接故障の2種類を仮定した自動販売機やATMの確率モデルの点検方策を考える。このような自動販売機やATMの監視を運用する場合，故障の分布，点検費用と故障による損失費用を与えて，無人期間の期待費用を求める。さらに，この費用を最小にする最適点検時間を解析的に求め，種々議論する。

2. モデル

集中監視装置は，自動販売機やATMの状態をディスプレイに表示する。状態はおおよそ次の4つの状態に分類することができ，監視員は監視装置に表示された状態により定められた対応をする。

状態0：正常（監視装置に障害の表示が無い

状態）。

状態1：障害発生（現在は故障ではないが，近い将来故障になり易い状態）。例えば，一般の自動販売機では商品が，ATMでは現金がまもなく無くなることやレシートが無くなるという警告などである。また，機械の物理的な故障，例えば，自動販売機ではプリペイドカード，ATMではキャッシュカードや現金が機械に詰まって取れなくなった場合である。

状態2：障害発生後， t_0 時間後に点検する。ただし，監視員による端末機の遠隔操作によって障害が取り除かれる場合などは考慮しない。技術員が現場に実際に出向し，故障にいたる前に障害を取り除く。その作業は，ATMでは現金のキャッシュボックスを取替えたり，レシートやジャーナル用紙を補充するといった比較的簡単な作業である。

状態3：障害発生後，点検時間 t_0 までに故障する（故障1）。障害発生後，技術員が現場に到着する前に故障となる状態である。従って，故障になってから技術員が現場に到着するまで，自動販売機やATMを使用することはできない。これらの障害の復旧方法は，現金のキャッシュボックスを取り替えたり，レシートやジャーナル用紙を補充する簡単な作業のことが多い。

状態4：機械的な故障（故障2）。機械の物理的な故障であり，電源断，機械の不都合（故障），商品，現金，カードが機械に詰まり取れなくなる場合であり，技術員が出向しないと修理できない。したがって，故障になってから技術員が現場に到着するまで，自動販売機やATMを使用することはできない。一般的に，故障の復旧時間は状態3より長い。

状態0は正常状態である。状態0から状態1の推移は，監視センターの表示装置に障害の発生が通知される状態である。状態0から状態4への推移は，自動販売機やATMの機

械的な故障発生を監視センターへ通知する状態である。状態1では、監視センターの監視員が自動販売機やATMの機械の状態を判断する。そこで、状態1から状態4への推移は、機械的な故障でこれ以上使用できないと判断し自動販売機やATMを停止させ、技術員の派遣を要請する場合である。一方、状態1から状態3への推移は、商品、現金、レシート用紙、ジャーナル用紙切れになる予告がなされ、技術員が現場に到着する前に商品、現金、レシート用紙、ジャーナル用紙切れとなり、故障となる状態である。さらに、状態1から状態2への推移は、商品、現金、レシート用紙、ジャーナル用紙切れになる予告がなされ、現場への技術員の派遣を要請し、商品、現金、レシート用紙、ジャーナル用紙切れの前に技術員が到着し、障害に対処する場合である。これらの状態推移関係を図1に示す。

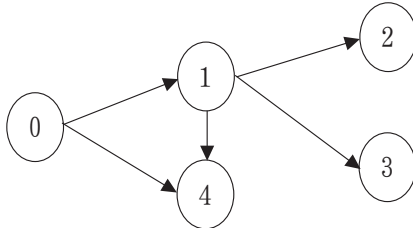


図1: 状態推移図

自動販売機やATMの運用では、商品、現金、レシート用紙、ジャーナル用紙に関する障害は、稼動期間中（監視可能な時間中）では1日1回以下の発生であり、1日に1回の商品、現金、レシート用紙補充をすることによってこの障害が発生することはほとんどない。したがって、自動販売機やATM稼動期間を $(0, T]$ 間として、障害は1回しか発生しないと仮定する。自動販売機やATM障害発生分布を一般分布 $F_0(t)$ とする。また、障害発生後、時刻 t までに自動販売機やAT

Mが故障する故障1の一般分布を $F_1(t)$ とおき、さらに、自動販売機やATMの故障2の分布を $F_2(t)$ とおく。ここでは、1台の自動販売機やATMについて考え、自動販売機やATMが複数台設置してある自動販売機やATMコーナーでは、1台が故障となった場合には修理を行わず、最後の1台の障害が発生した場合を想定する。ここで、自動販売機やATM稼動期間中における障害、故障1と故障2の発生状態を考慮し、全ての組み合わせの場合についての確率をもとめる。ここで、 $\bar{F} = 1 - F$ とおく。

- (i) $(0, T]$ 間で障害と故障2が発生しない確率

$$\bar{F}_0(T) \bar{F}_2(T) \quad (1)$$

- (ii) $(0, T]$ 間で障害が発生する前に故障2が発生する確率

$$\int_0^T \bar{F}_0(x) dF_2(x) \quad (2)$$

- (iii) 障害発生後、故障が起こらず T で点検する確率

$$\bar{F}_2(T) \int_{T-t_0}^T \bar{F}_1(T-x) dF_0(x) \quad (3)$$

- (iv) 障害発生後、故障1が発生する確率（図2参照）

$$\int_{T-t_0}^T dF_0(x) \int_0^{T-x} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \quad (4)$$

- (v) 障害発生後、故障2が発生する確率

$$\int_{T-t_0}^T dF_0(x) \int_x^T \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \quad (5)$$

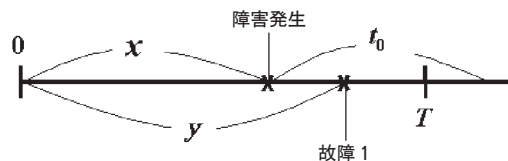


図2: 故障1が発生する確率

(vi) 障害発生後， t_0 で点検する確率

$$\int_0^{T-t_0} dF_0(x) \bar{F}_2(t_0+x) \bar{F}_1(t_0) \quad (6)$$

(vii) 障害発生後， t_0 までに故障 1 が発生する確率

$$\int_0^{T-t_0} dF_0(x) \int_0^{t_0} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \quad (7)$$

(viii) 障害発生後， t_0 までに故障 2 が発生する確率（図 3 参照）

$$\int_0^{T-t_0} dF_0(x) \int_x^{x+t_0} \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \quad (8)$$

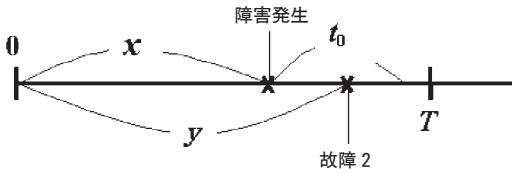


図 3: t_0 までに故障 2 が発生する確率

明らかに，

$$\begin{aligned} & (3) + (4) + (5) = \\ & \int_{T-t_0}^T dF_0(x) \left[\bar{F}_2(T) \bar{F}_1(T-x) \right. \\ & + \int_0^{T-x} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \\ & + \left. \int_x^T \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \right] \\ & = \int_{T-t_0}^T \bar{F}_2(x) dF_0(x) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & (6) + (7) + (8) = \\ & \int_0^{T-t_0} dF_0(x) \left[\bar{F}_2(t_0+x) \bar{F}_1(t_0) \right. \\ & + \int_0^{t_0} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \\ & + \left. \int_x^{x+t_0} \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \right] \\ & = \int_0^{T-t_0} \bar{F}_2(x) dF_0(x) \end{aligned} \quad (10)$$

よって，

$$(1) + (2) + (9) + (10) =$$

$$\bar{F}_0(T) \bar{F}_2(T) + \int_0^T \bar{F}_0(x) dF_2(x)$$

$$+ \int_0^T \bar{F}_2(x) dF_0(x)$$

$$= 1$$

である。

3. 期待費用

ここで，次の費用を導入する。

c_0 : T 時点における自動販売機やATMの点検費用。 T 時点で自動販売機やATMは終了する。該店舗の自動販売機やATMを稼動する前に点検を行ない，商品，現金・ジャーナル用紙・レシート用紙の補充などを行なう費用である。

c_1 : t_0 時点の点検費用。商品，現金回収，現金カセット・ジャーナル用紙・レシート用紙の詰め換え作業で比較的短時間で作業が完了する。 c_0 の費用と比較すると現場への派遣費用などが必要となり費用は若干高くなる。

c_2 : 故障 1 の費用。障害発生後， t_0 時点から技術員が到着するまでの間自動販売機やATMは停止している。この間，顧客は，自動販売機やATMを利用できないので近くの自動販売機や近くの他銀行のATMを利用する。ATMの利用ではこのような場合，顧客は他銀行に手数料を支払うのみならず，当該銀行も顧客が利用した銀行に手数料を支払う。また，逆の場合もある。他銀行の顧客が，当該ATMを利用しに来たが故障のために利用できない場合，他銀行からの手数料が入らなかった損失費用などを含む。また，自動販売機で同様な状況が発生して機会損失が発生する。この両方の費用の合計と c_1 で発生する費用の合計である。

c_3 : 故障 2 の費用。障害が発生して即故障となるため，障害発生から技術員が現場に到着し修理が完了するまで自動販売機やATMは

停止している。明らかに、この時間は、故障1の故障中の時間より長いことが一般的であるので、したがって、 c_2 よりも費用は大きくなる。

すなわち、一般的に $c_3 > c_2 > c_1 > c_0$ と仮定することができる。上記の記号の下で自動販売機やATM稼働 $(0, T]$ 間の総期待費用は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 C(t_0) = & c_0 \bar{F}_2(T) \left[\bar{F}_0(T) + \int_{T-t_0}^T \bar{F}_1(T-x) dF_0(x) \right] \\
 & + c_1 \bar{F}_1(t_0) \int_0^{T-t_0} \bar{F}_2(t_0+x) dF_0(x) \\
 & + c_2 \left[\int_{T-t_0}^T dF_0(x) \int_0^{T-x} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \right. \\
 & \left. + \int_0^{T-t_0} dF_0(x) \int_0^{t_0} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \right] \\
 & + c_3 \left[\int_0^T \bar{F}_0(x) dF_2(x) \right. \\
 & \left. + \int_{T-t_0}^T dF_0(x) \int_x^T \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \right. \\
 & \left. + \int_0^{T-t_0} dF_0(x) \int_x^{x+t_0} \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \right] \\
 & (0 \leq t_0 \leq T) \quad (11)
 \end{aligned}$$

4. 最適方策

自動販売機やATMの運用において、障害が発生してから、何時間後に技術員を派遣すべきかが問題である。すなわち、障害発生が自動販売機やATMの稼働終了間際であれば、しばらく放置しておき、故障が起ったとしても時刻Tの点検時に修復させたほうが得策である。しかし、たばこやジュース類の自動販売機では取り扱う商品の金額が少額なことから、このような時間は問題とならない場合も考えられる。式(11)で与えられる期待費用 $C(t_0)$ を最小にする t_0^* ($0 \leq t_0^* \leq T$) を求める。とくに、 $t_0 = 0$ 、すなわち、障害が起ったら、すぐ点検する場合の期待費用は、

$$C(0) = c_0 \bar{F}_2(T) \bar{F}_0(T)$$

$$\begin{aligned}
 & + c_1 \int_0^T \bar{F}_2(x) dF_0(x) \\
 & + c_3 \int_0^T \bar{F}_0(x) dF_2(x) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$t_0 = T$ 、すなわち、障害が起っても、 t_0 に点検せずに放置する場合の期待費用は、

$$\begin{aligned}
 C(T) = & c_0 \bar{F}_2(T) \left[\bar{F}_0(T) \right. \\
 & \left. + \int_0^T \bar{F}_1(T-x) dF_0(x) \right] \\
 & + c_2 \int_0^T dF_0(x) \int_0^{T-x} \bar{F}_2(x+y) dF_1(y) \\
 & + c_3 \left[\int_0^T \bar{F}_0(x) dF_2(x) \right. \\
 & \left. + \int_0^T dF_0(x) \int_x^T \bar{F}_1(y-x) dF_2(y) \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

いま、分布 $F_1(t)$ と $F_2(t)$ の密度関数をそれぞれ、 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $F_1(t)$ の故障率を $\gamma_1(t) \equiv f_1(t)/\bar{F}_1(t)$ とおく。そのとき、 $C'(t_0) = 0$ とおくことによって、次式を得る。

$$\begin{aligned}
 & (c_2 - c_1) \gamma_1(t_0) \int_0^{T-t_0} \bar{F}_2(x+t_0) dF_0(x) \\
 & + (c_3 - c_1) \int_0^{T-t_0} f_2(x+t_0) dF_0(x) \\
 & = (c_1 - c_0) \bar{F}_2(T) f_0(T-t_0) \\
 & (0 \leq t_0 \leq T) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\gamma_1(t) \equiv \frac{f_1(t)}{\bar{F}_1(t)}, f_1(t) \equiv F_1'(t), f_2(t) \equiv F_2'(t)$$

特別な場合として、自動販売機やATMの障害発生分布 $F_0(t)$ と故障2の分布を指数分布の場合と考える。すなわち、 $F_0(x) = 1 - e^{-\lambda_0 x}$ 、 $F_2(x) = 1 - e^{-\lambda_2 x}$ のとき、(14)式は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \left[(c_2 - c_1) \gamma_1(t_0) + (c_3 - c_1) \lambda_2 \right] \\
 & \times \frac{e^{(\lambda_0 + \lambda_2)(T-t_0)} - 1}{\lambda_0 + \lambda_2} = c_1 - c_0 \quad (15)
 \end{aligned}$$

(15)式の左辺を $Q(t_0)$ とおく。一般的に、 $Q(t_0)$ の単調性を証明することはできないが、 $\gamma_1(0) = 0$ のとき、

$$Q(0) = (c_3 - c_1) \frac{\lambda_2}{\lambda_0 + \lambda_2} \left[e^{(\lambda_0 + \lambda_2)T} - 1 \right] > 0$$

$$Q(T) = 0$$

となる．

したがって， $Q(t_0)$ を最小にする t_0^* は次のように求められる．

(i) もし，(15)式を満たす t_0 存在するならば，各々の t_0 に対して，(11)式で与えられる $C(t_0)$ を計算する．このような $C(t_0)$ を(12)式で与えられる $C(0)$ ，(13)式で与えられる $C(T)$ と比べて，最小値を与える t_0 を t_0^* とおく．

(ii) もし，(15)式を満たす t_0 が存在しなければ， $t_0^* = T$ であり，障害が発生しても放置しておき， T 時点でのみ修理する．明らかに， $r_1(t_0)$ が非増加関数ならば， $Q(t_0)$ は単調減少関数となり， $t_0^* = 0$ または $t_0^* = T$ となる．

5. 数値計算

ここでの数値は自動販売機運用管理を想定している．一般に，障害が発生してから，故障1が発生する時間はIFR (increasing failure rate) に従うと考えて，故障1の分布 $F_1(t)$ をワイブル分布，いわば， $F_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t^m}$ ($m > 1$) とおく．そのとき， $\lambda_0 = 4.0/1000.0$ ， $\lambda_1 = 5.0/1000.0$ ， $c_0 = 5.0$ ， $c_1 = 7.0$ ， $c_2 = 10.0$ ， $c_3 = 15.0$ ， $m = 1.3$ ， $T = 24.0$ における $\lambda_2 = 1.0/1000.0 \sim 3.9/1000.0$ の変化に対して $C(t_0^*)$ と t_0^* の関係を表1に示した．すなわち，24時間稼働しているが毎日1回所属の係員が商品の補充などの点検をすとする．表1は，機械的な故障（故障2） λ_2 の変化に対して，障害が発生してから技術員を派遣し修理を完了しなければならない時間を示している．故障2の発生確率が高くなると，すなわち，自動販売機が頻繁に故障する様になると，すぐには修理しないほうが良いことを示している．具体的には，自動販売機の故障2のパラメータ $\lambda_2 = 1/1000$ のと

き，修理完了まで1時間50分であったのが， $\lambda_2 = 2.2/1000$ のとき，2時間30分と長くなっている．このような，自動販売機の機械的な故障（故障2）が起こりやすくなると，故障の原因が所属の係員によって修理可能であれば，なるべく放置しておいた方がよいことを示している．

表1：自動販売機最適修理完了時間

$$\lambda_0 = 4.0/1000, \lambda_1 = 5.0/1000$$

$c_0 = 5.0, c_1 = 7.0, c_2 = 10.0, c_3 = 15.0$		
λ_2	t_0^*	$C(t_0^*)$
1.0/1000	1:50	5.389
1.2/1000	2:00	5.430
1.5/1000	2:10	5.492
1.8/1000	2:20	5.553
2.2/1000	2:30	5.634
2.6/1000	2:40	5.713
3.0/1000	2:50	5.792
3.6/1000	3:00	5.909
3.9/1000	3:10	5.967

6. むすび

自動販売機やATMの自動監視システム運用における障害発生から故障に至るまでをモデル化した．自動販売機やATMの障害に関わる直接的な各種費用を与えて期待費用を解析的に求めた．その結果，ある一定条件のもとで，総期待費用を最小にする最適な点検時間が存在することを示した．

今回， λ_2 の変化に対する総期待費用が最小となる最適な点検時間を数値計算によって求めた．期待費用を最小にするという意味において， c_0 ， c_1 ， c_2 と c_3 の費用の相対的な値の変化によって最適な時間 t_0^* の値も変動する．ここでは，自動販売機の機械的な故障率の変化による最適な復旧までの時間を解析的に求め，議論した．

今後，自動販売機やATMを含め障害・故

障発生現象の解析と、原価計算の観点から厳密に求められた、障害に係わる費用を検証する必要がある。これらから運用に係わる総期待費用を求めて、実際面との比較検討を行い、モデルの適合性を高める必要がある。特に、自動機、ここでは自動販売機やATMの取り扱い金額の特性を考慮に入れたモデル解析が必要となる。一般に、たばこやジュース類の自動販売機では取り扱い金額が小さいことから、故障への対応の緊急性など考慮する課題がある。

参考文献

- [1] 中村正治, 三道弘明, 中川覃夫: 無人ATMにおける最適予備キャッシュボックス数, 日本OR学会誌, vol.42, no.10, pp.663-666 (1997).
- [2] 田井等, 長谷川篤: 自動機監視システムにおける高信頼性技術, 日立TS技報, 第3号, 平成10年, pp.31~32(1998).
- [3] R.E.Barlow and F.Proshan, Mathematical Theory of Reliability, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- [4] Shunji Osaki, Stochastic System Reliability Modeling, World Scientific Co Pte Ltd., 1985.
- [5] http://www.jpo.go.jp/shiryos/s_sonota/map/ippan23/2/2-6-1-1.htm